

# Ausgewählte Kapitel der Photogrammetrie (PAK) 2011 WS

## 3D Kameras – Aufnahmetechnik TOF-Kamera

Studentische Ausarbeitung  
von

Wolfgang Wiedemann



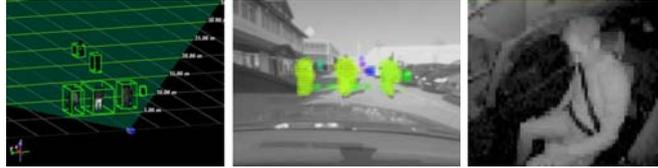
### Inhalt

- 3D Kameras – Aufnahmetechnik TOF-Kamera
  - 1. Anwendungen, Motivation und Einordnung
  - 2. Technischer Aufbau und Komponenten der TOF-Kamera
  - 3. Prinzip der Streckenmessung in TOF-Kameras
  - 4. Fehlereinflüsse und Möglichkeiten der Kalibrierung
  - 5. Verschiedene TOF-Kamera-Systeme
  - 6. Anwendungsbeispiel
  - 7. Zusammenfassung



## 1.1 Anwendungen (1)

### □ Automobilindustrie



[PMD – Technologies]

- Kollisionswarnung
- Parkhilfen und Parkassistenten
- Überwachung der Fahrgastzelle z.B. zur Airbag-Steuerung

### □ Mensch-Maschinen-Interaktion



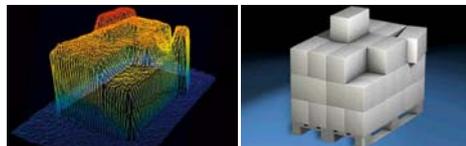
[Panasonic]



## 1.1 Anwendungen (2)

### □ Sicherheit / Produktionsüberwachung

- Automatische Personenzählung
- Kontrolle automatischer Türen
- Überwachen der Arbeitsräume von Maschinen
- Qualitätssicherung in Produktionsstraßen



[PMD – Technologies]

### □ Medizin

- Atmungskontrollen in CT oder MRT

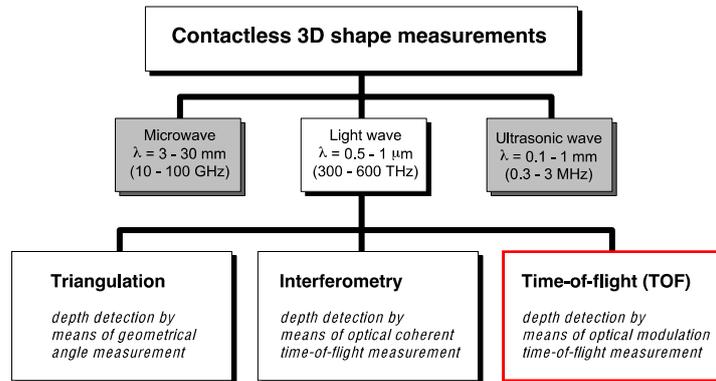
### □ Robotik

- Erkennen von Hindernissen
- Erfassen der Umgebung



## 1.2 Einordnung von TOF in Oberflächenmessverfahren (1)

- nicht berührungslose Verfahren
- berührungslose Verfahren

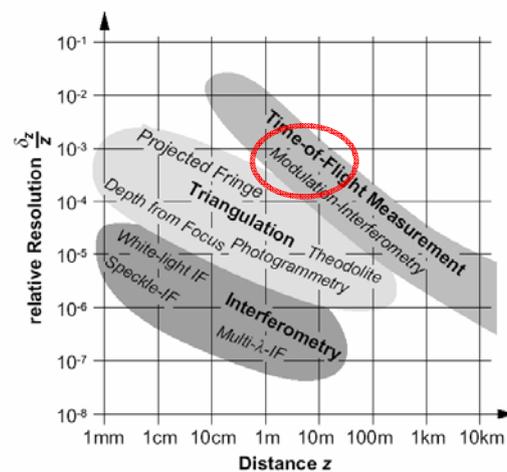


[Lange 2000]



## 1.2 Einordnung von TOF in Oberflächenmessverfahren (2)

- Relative Messgenauigkeit:



Arbeitsbereich TOF-Kamera

[Luan 2001]



### 1.3 Motivation

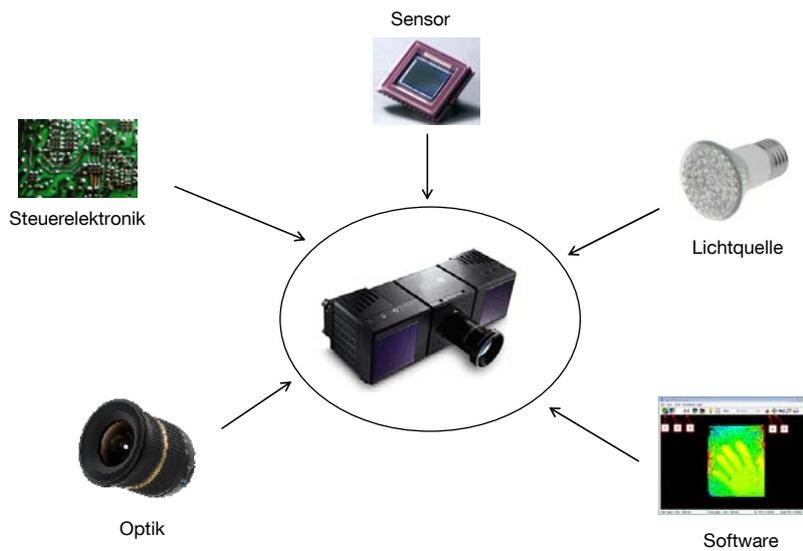
- Gesucht: 3D Koordinaten
- Mögliche Messverfahren und ihre Nachteile:
  - Laserscann:
    - Diskrete Abtastung
    - Sequenzielle Erfassung einer Szene
  - Stereobilder:
    - Aufwendige Installation, Kalibrierung und Auswertung
    - problematisch bei nichttexturierten Flächen
    - Beleuchtung
- Alternative: **TOF – Kamera**
  - Flächenhafte Erfassung des Objekts zu einem Zeitpunkt
  - Eigene Lichtquelle



D-Imager by Panasonic PMD(Vision) CamCube by PMDTechnologies FOTONIC-B70 by Fotonics SwissRanger 4000 by MESA Imaging 3D MLI Sensor by IEE S.A. ARTTS camera prototype PMD(Vision) CamBoard by PMDTechnologies [Wikipedia]



### 2.1 Komponenten der TOF Kamera



Bilder: [Wikipedia]

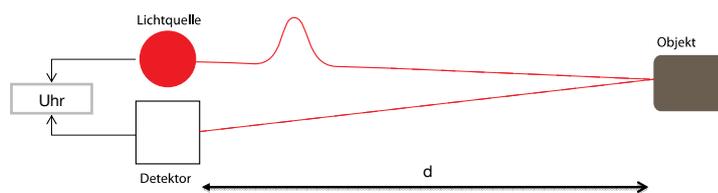


### 3 Techniken der Laufzeitmessung

- Messverfahren:
    - Pulslaufverfahren
      - Aussenden eines einzelnen Lichtpulses
      - Messen der Laufzeit für Hin- und Rückweg
      - Distanzberechnung
    - Phasendifferenzen
      - Aussenden eines modulierten Signals
      - Messen der Phasenlage des zurückgeworfenen Signals
      - Distanzberechnung
- In TOF-Kamera über **Photon Mixing Devices (PMD)**



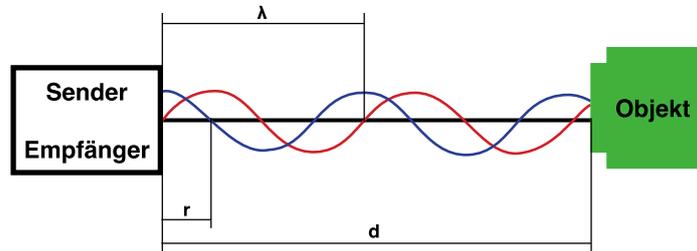
### 3.1 Pulslaufverfahren



- Messprinzip
  - Lichtquelle sendet einzelnen Lichtpuls aus
  - Zeitmessung bis zurückgestreuter Puls wieder am Detektor ein trifft
  - Distanz :  $d = \frac{1}{2} \Delta t \cdot c_0$
- Anforderung an Zeitmessung
  - Beispiel: Auflösung  $d=1\text{mm}$
  - $$\Delta t = \frac{2 \cdot d}{c} = \frac{0.002\text{m}}{300000000 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 6,7 \text{ps}$$
  - Genauigkeit mit heutigen Intervallzählern : ca. 5 mm



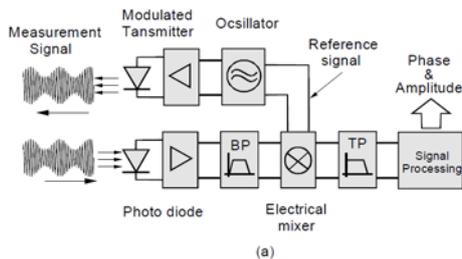
### 3.2 Phasendifferenzen



- Messprinzip
  - Kontinuierliches Signal wird ausgesendet
  - Messen der Phasendifferenz  $r$
  - Distanzberechnung:
 
$$d = \frac{1}{2}(n \cdot \lambda + r)$$
- Mehrdeutigkeiten  $n$  müssen bestimmt oder der Messbereich auf  $\lambda/2$  beschränkt werden
- Ausgesendetes Signal bei TOF meist Continuous-Wave, aber auch beliebige andere Modulationen denkbar (z.B. Pseudo-Noise-Code)



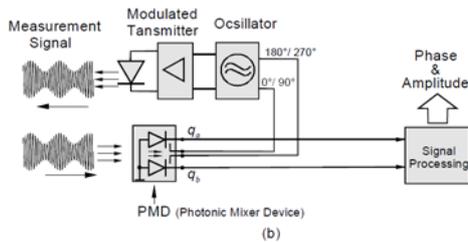
### 3.2 Continuous Wave Modulation (1)



#### a) Herkömmlicher Aufbau einer Laufzeitmessung mit Continuous-Wave-Modulation

Nachteil:

- große Bauweise
- hohe Spannung
- hoher Strombedarf



#### b) Demodulation über Photon Mixing Device (PMD)

Vorteil:

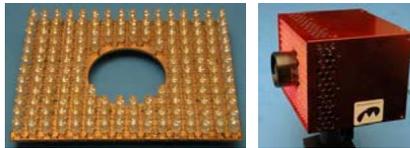
- Klein Bauweise da integriert in Silizium Chip
- Relativ günstige Herstellung
- Flächenhaftes Array von Sensorelementen zur Entfernungsmessung

[Luan 2001]



### 3.2 Continuous Wave Modulation (2)

- Was wird bei der TOF-Kamera moduliert?
  - Intensitätsmoduliertes Licht
  - Lichtquelle im nicht sichtbarem nahem Infrarot (typisch  $\lambda = 850 \text{ nm}$ )
  - Intensitätsmodulation über Ein- und Ausschalten von einzelnen LEDs in einem LED-Array, so dass sinusförmige Helligkeitsvariation entsteht
  - Modulationsfrequenz variabel, für viel Kameras typisch: 20 MHz

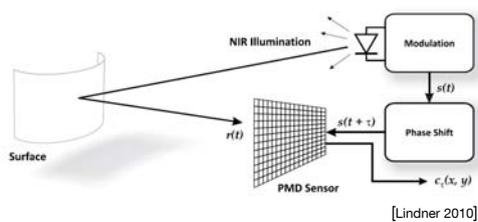


LED – Array einer TOF-Kamera

[Lange 2000]



### 3.2 Phasendifferenzmessung in PMD (1)



- $s(t)$  moduliertes ausgesendetes Lichtsignal
- $r(t)$  reflektiertes Lichtsignal
- $s(t + \tau_i)$  phasenverschobenes Ausgangssignal
- $c_\tau(x, y)$  zugehörige Kreuzkorrelation
- $\tau_i$  Phasenversatz:  $0^\circ \quad 90^\circ \quad 180^\circ \quad 270^\circ$

[Lindner 2010]

Kreuzkorrelation aus dem vom Objekt zurück geworfenem Lichtsignal und dem um  $\tau_i$  verschobenem Modulationssignal in jedem Pixel:

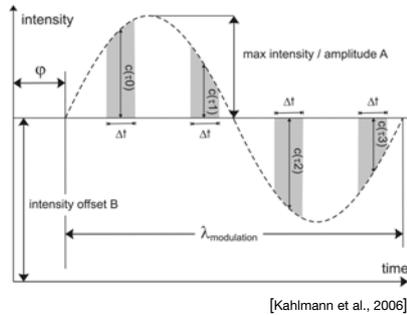
$$c(\tau_i) = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T/2}^{T/2} r(t) \cdot s(t + \tau_i) dt$$

Ist über sog. ‚CCD/CMOS Lock-In Pixel‘ auf Chip implementiert



### 3.2 Phasendifferenzmessung in PMD (2)

- Aus den berechneten Kreuzkorrelationen  $c(\tau_i)$  können weiter Größen abgeleitet werden:



- Phasenversatz (→ Distanz zum Objekt):

$$\varphi = \arctan\left(\frac{c(\tau_3) - c(\tau_1)}{c(\tau_0) - c(\tau_2)}\right)$$

- Intensität (→ Rückstreuungseigenschaften des Objekts):

$$B = \frac{1}{4} \sum_{i=0}^3 c(\tau_i)$$

- Amplitude (→ Güte der Korrelation):

$$A = \frac{1}{2} \sqrt{(c(\tau_3) - c(\tau_1))^2 + (c(\tau_0) - c(\tau_2))^2}$$



### 3.2 Bestimmung der Entfernung aus Phasendifferenzen

- Entfernung aus Phasenversatz:

$$d = \frac{1}{2} \cdot \lambda_{Modulation} \cdot \frac{\varphi}{2\pi}$$

- Problem der Mehrdeutigkeiten der Phasendifferenz-Methode:

- Beispiel: Wellenlänge für typische Modulationsfrequenz von 20 MHz:

$$\lambda_{Modulation} = \frac{c_0}{f} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{20 \cdot 10^6 \text{ Hz}} = 15 \text{ m}$$

→ Mehrdeutigkeitsfreier Messbereich von 7,5 m

- Kompromiss zwischen Messweite und Messgenauigkeit muss getroffen werden:

- Kleinere Modulationsfrequenz würde Messbereich vergrößern
- Genauigkeit der Phasenlagenbestimmung nimmt dadurch ab, da diese Proportional zur Wellenlänge ist



#### 4 Fehlereinflüsse (1): Optisches System (1)

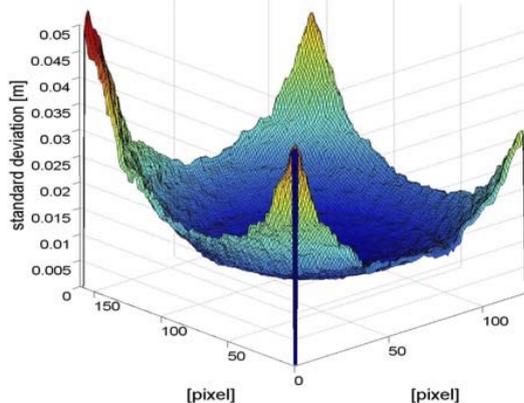
- **Verzeichnungen des Objektivs**
  - Radiale Verzeichnung
  - Tangentiale Verzeichnung
  - Einfluss auf Lage der Bildpunkte
  - Kann durch Kamerakalibrierung behoben werden
- **Randlichtabfall am Objektiv**
- **Schlechte Ausleuchtung des Objektraums an den Bildrändern**
  - Verschlechterung der Genauigkeit der Entfernungsmessung der Randpixel. Genauigkeit, mit der Phasenversatzes bestimmt werden kann, hängt von der Intensität des zurückgeworfenen Signals abhängt.
  - Kann nicht durch Kalibrierung behoben werden.
  - Bekannte Verfahren zur Behebung des Randlichtabfalls bei der radiometrischen Kalibrierung haben keine Wirkung, da ungenaue Korrelation bereits auf Sensorebene durchgeführt wurde.



#### 4 Fehlereinflüsse (1): Optisches System (2)

- **Auswirkungen der Fehler im Optischen System:**
  - Beispiel: SwissRanger SR-3000 mit Modulationsfrequenz 20 MHz

Standartabweichung der einzelnen Pixel aus 200 Messungen: 6 mm – 5 cm



Deutliche Verschlechterung der Messgenauigkeit mit wachsendem Abstand zum Sensormittelpunkt

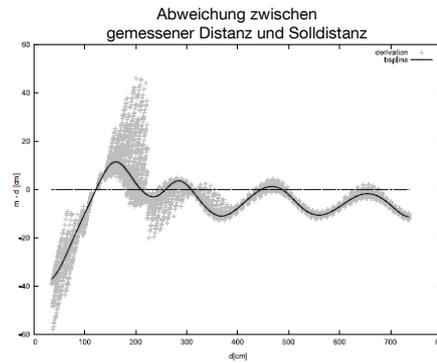
[Kahlmann et al., 2006]



#### 4 Fehlereinflüsse (2)

##### Demodulationsfehler

- Ansteuerung des LED-Arrays ermöglicht kein exakt sinusförmiges Modulationssignal
- Demodulationsfehler führt einer fehlerhaften Distanzbestimmung
- Fehler kann im Labor untersucht und so korrigiert werden



[Lindner 2010]



#### 4 Fehlereinflüsse (3)

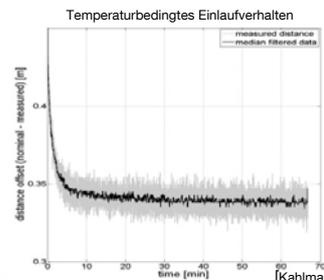
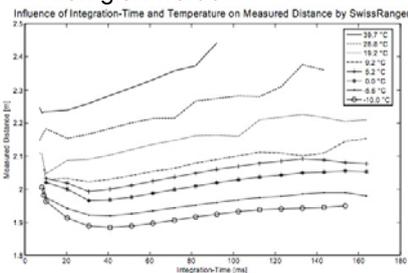
##### Integrationszeit

- Strecke steigt konstant, monoton mit der Integrationszeit an

##### Temperatur:

- Einlaufverhalten des Sensors muss beachtet werden
- Rauschen im Sensor nimmt mit Temperatur zu
- äußere Temperatur beeinflusst Entfernungsmessung

→ Diese Fehler können im Labor untersucht und z.B. über Lookup-Tabellen korrigiert werden

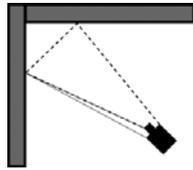


[Kahlmann et al., 2006]



#### 4 Fehlereinflüsse (4)

##### □ Mehrwegeeffekte



- Entstehen meist in Ecken durch Mehrfachreflektion (Jumping Edges)
- Kann zum Teil im Postprocessing behoben werden (z.B. über Flächennormalen benachbarter Pixel)

[Foix et al., 2011]

##### □ Fehler durch Streulicht aus anderen Quellen

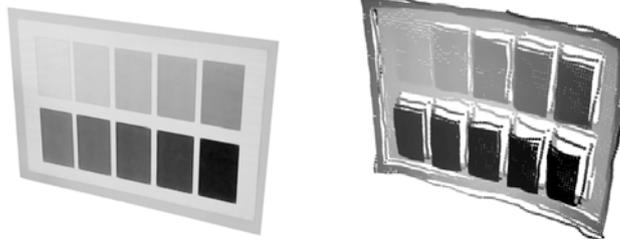
- Fremde Lichtquellen im gleichen Frequenzbereich wie die Beleuchtungseinheit der TOF-Kamera können Ergebnisse verfälschen und stören
  - Ist vor allem im Außenbereich zu beachten (Sonne)
- Problematik kann durch ein schmalbandiges Filter im Bereich der NIR-Frequenz der Kamera minimiert werden (Restlichtunterdrückung)



#### 4 Fehlereinflüsse (5)

##### □ Fehler durch Intensitätsschwankungen bei Variationen der Textur

- Unterschiedliche Reflektivität des Messobjektes führt zu fehlerhaften Distanzmessungen
- Ursachen nur teilweise verstanden
- Kalibrierfunktion ist in aktueller Forschung [Lindner 2010]



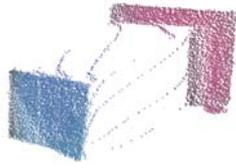
Grauwertkarte mit konstanten Abstand zur Kamera (links) und mit TOF-Kamera ermittelte Distanz (rechts)

[Lindner 2010]



#### 4 Fehlereinflüsse (6)

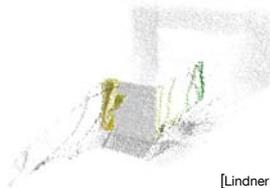
##### □ ‚Flying-Pixels‘



[Lindner 2010]

- Entstehen bei Messpunkten die auf Ecken und Kanten fallen
- Unterschiedliche Objektentfernungen innerhalb eines Pixels
- Filterung schwer, aber über Nachbarschaften im Postprocessing möglich

##### □ Bewegungsartefakte



[Lindner 2010]

- Entstehen durch Bewegung der Kamera, Bewegung des Objektes oder eine eventuelle Texturänderung während der Messung
- Durch Bewegung Mischung von Vorder- und Hintergrund während der Integrationszeit
- Erste Ansätze zur Filterung bei bekanntem Bewegungsmodell sind veröffentlicht [Lindner 2010]



#### 5 Vergleich von TOF-Systemen (1)



Hersteller	Fotonic	Mesa Imaging	PMDTec	Panasonic
Modell	D70	SR4000	CamCube 3.0	3D-Imager
Pixel	160 x 120	176 x 144	200 x 200	160 x 120
Messbereich	0.1 – 7 m	0.1 - 10 m	0.3 – 7 m	1.2 – 9 m
Genauigkeit	+/- 3 mm at 0.1–3 m +/- 15 mm at 3–7 m	+/-15 mm	< 3mm Wiederholgenauigkeit	30 mm
Bildrate	50 fps	50 fps	40 fps	30 fps

Bildquell: Hersteller



## 5 Vergleich von TOF-Systemen (2)

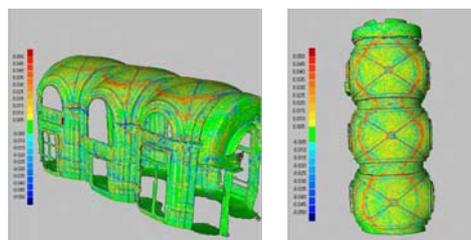
- Es gibt eine Vielzahl an Herstellern von TOF-Kameras
- Unterschiede der Einzelsysteme oft gering:
  - Messbereich meist zwischen 0.1 m und 10 m da Einsatz hauptsächlich noch in der Produktionskontrolle und Überwachung statt findet; dort geringe Messweiten ausreichend
  - Hohe Bildraten (30 – 50 Hz) bei fast allen Systemen möglich
  - Sensorgröße bewegt sich bei fast allen modernen Kamera bei ca. 200 x 200 Pixeln
- ABER: Messgenauigkeit der Einzelsystem (soweit man dies aus Herstellerangaben ableiten kann) variieren stark
  - Kameras für Sicherheits- und Überwachungszwecke oft sehr ungenau (Messgenauigkeit nur auf mehrere cm)



## 6 Anwendungsbeispiel (1)

- Vervollständigung von Stadtmodellen mittels Distanzkameras [Niedermayer 2010]
  - Verwendete Kamera: SwissRanger SR3000
  - Zur Erfassung der gesamten Passage waren 3 Standpunkte nötig
  - Insgesamt 250 Aufnahmen erforderlich (beschränktes Blickfeld der Kamera, hohe Überdeckung zwischen den Aufnahmen nötig)
  - Verknüpfung der einzelnen Standpunkte über ICP-Algorithmus

Aus Punktwolke modellierte Passage

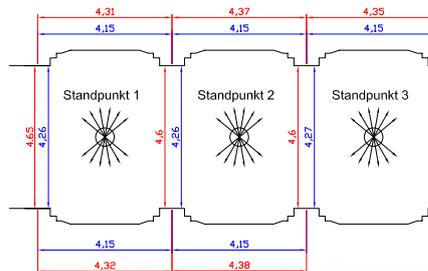


[Niedermayer 2010]



## 6 Anwendungsbeispiel (2)

- Ergebnis:
  - Betrieb der Kamera auf Stativ, bewegtes filmen lieferte zu wenig Verknüpfungspunkte für Zuordnung zwischen den Einzelaufnahmen
  - Ermittelte Maße um 5%-8% zu groß (wahrscheinlich fehlerhafte / unzureichende Kalibrierung)
  - Wegen hoher Anzahl an benötigter Aufnahmen Wirtschaftlichkeit fraglich
  - Modell für Texturierung und Einbindung in ein Stadtmodell aber ausreichend genau
  - Für große Gebäude ungeeignet da bereits hier Kamera an die Grenzen ihres Messbereichs stößt



Ermittelte Maße:  
blau: Spannmaße am Gebäude gemessen  
rot: Abgriff der Spannmaße aus  
aufgenommener Punktwolke

[Niedermayr 2010]



## 7 Zusammenfassung (1)

- Distanzbestimmung mit TOF-Kameras basiert auf der Technik der indirekten Laufzeitmessung über die Bestimmung des Phasenversatzes zwischen ausgesendetem und empfangenem Signal
- Ausgesendetes Signal ist dabei intensitätsmoduliertes NIR-Licht und wird durch ein LED-Array an der TOF-Kamera erzeugt
- Die Phasendifferenz wird in speziellen Chips (PMDs) für alle Pixel gleichzeitig ermittelt; daraus lässt sich die Entfernung bestimmen (Arbeitsbereich beachten / Mehrdeutigkeiten)
- Neben der Entfernung wird gleichzeitig ein Intensitätsbild, welches die Rückstreuungseigenschaften der Objektoberflächen zeigt, und ein Amplitudenbild, das die Güte der Messung wiedergibt, erzeugt. Dies erleichtert die Filterung von Fehlmessung
- Für die Anwendung mit höherer Genauigkeit ist eine umfassende Kamerakalibrierung nötig



## 7 Zusammenfassung (2)



- Gegenüber anderen System zeichnet die TOF-Kamera aus:
  - Erfassung einer gesamten Szene zum gleiche Zeitpunkt
  - Hohe Bildrate (30-100 Hz)
  - Kleine Bauweise
  - Unabhängig von Umgebungsbeleuchtung da eigene Lichtquelle
  
- Nachteile der TOF-Kamera sind
  - Geringe Pixelzahl (ca. 200 x 200 Bildpunkte)
  - Geringe Reichweite (meist nur bis ca. 10 m)
  - Für exakte Oberflächen Rekonstruktion zu ungenau (vgl. z.B. Streifenlichtprojektion)
  
- TOF-Kameras geeignet für:
  - Kontroll- und Überwachungsaufgaben
  - Geodätische Anwendung bei denen cm Genauigkeiten ausreichend ist (z.B. Fassadenrekonstruktion für Stadtmodelle)



## Hersteller



- PMD – Technologies (<http://www.pmdtec.com>)
- Mesa Imaging (<http://www.mesa-imaging.ch>)
- Fotonic (<http://www.fotonic.com>)
- Panasonic Electric Works (<http://pewa.panasonic.com>)
- IEE (<http://www.iee.lu>)
- TriDiCam (<http://www.tridicam.net>)
- Cedes (<http://www.cedes.com>)
- Canesta
- 3DV Systems (Pulsverfahren)



- Foix S, Alenyà G, Torras C (2011) Lock-in time-of-flight (TOF) cameras: A Survey. IEEE Sensors Journal, Vol. 11(9): 3408 - 3414
- Fuchs S, May S (2008) Calibration and registration for precise surface reconstruction with time-of-flight cameras. International Journal of Intelligent Systems Technologies and Applications, Issue on Dynamic 3D Imaging 5(3/4): 278-284
- Kahlmann T, Remondino F, Ingensand H (2006) Calibration for increased accuracy of the range imaging camera SwissRangerTM. Image Engineering and Vision Metrology 36(3): 136–141
- Lange R (2000) 3D Time-Of-Flight Distance measurement with custom solid-state image sensors in CMOS/CCD-Technology. Dissertation Fachbereich Elektrotechnik und Informatik, University Siegen
- Lindner M (2010) Calibration and real-time processing of time-of-flight range data. Dissertation Fachbereich Elektrotechnik und Informatik, Universität Siegen
- Luan X (2001) Experimental investigation of photonic mixer device and development of TOF 3D ranging systems based on PMD technology. Dissertation Fachbereich Elektrotechnik und Informatik, Universität Siegen
- Möller T, Kraft H, Frey J, Albrecht M, Lange R (2005) Robust 3D measurement with PMD sensors. Proceedings of the First Range Imaging Research Day at ETH Zürich
- Scherer M (2009) The 3D-TOF-Camera as an innovative and low-cost tool for recording, surveying and visualisation. Proceedings of 22<sup>nd</sup> CIPA Symposium, Kyoto, Japan
- Wallhoff F, Ruß M, Rigol G (2007) Improved Image Segmentation using Photonic Mixer Devices. Proceedings IEEE Intern. Conference on Image Processing, Vol. 1-7: 2849–2852
- Niedermayr S (2010) Vervollständigung von Stadtmodellen mittels Distanzkameras. Diplomarbeit Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technischen Universität Wien



- <http://de.wikipedia.org/wiki/Time-of-flight-Sensor>  
Abruf 19.12.2011
- [http://en.wikipedia.org/wiki/Time-of-flight\\_camera](http://en.wikipedia.org/wiki/Time-of-flight_camera)  
Abruf 19.12.2011
- <http://de.wikipedia.org/wiki/PMD-Sensor>  
Abruf 19.12.2011



- TOF-Kamera als solche erkennen
- Abgrenzung der TOF Kamera von anderen Systemen
- TOF Kameras nach Art der Distanzmessung einteilen können
- Grundprinzip der Entfernungsmessung mit einem PMD-Sensoren
- Fehlereinflüssen und Möglichkeiten der Kalibrierung der TOF-Kamera kennen.